

## 토목 설계를 위한 3차원 지반구조 모델링 적용 사례 연구

박준영, 이정상, 허승 (지오제니 컨설턴트)  
정성우 (SK 건설)

### 1. 서 론

토목 설계 수행과정에서 현장조사 및 시험을 통해 지형, 지질 및 지층 분포, 지하수 정보 등 현장에 대한 다양한 정보들이 수집되며 이는 구조물의 위치선정 및 안정성 검토에 중요한 요소로 사용된다. 그러나 현장조사 및 시험을 통해서는 점(지표조사), 선(시추조사), 단면(굴절법탐사)으로 표현되는 1~2차원적인 정보만을 얻을 수 있으며, 그나마도 현장여건 및 비용 등의 문제로 제한된 수량의 정보만을 취득할 수 있다. 지금까지 대부분의 토목 설계 과정에서는 제한된 정보를 보완하기 위해 점 및 선 자료간의 직선보간법 및 지표 및 시추조사와 물리탐사 등의 2차원 단면 조사의 결과를 비교 검토하는 2차원 단면법이 주로 사용되었다. 그러나 이러한 방법들 또한 지반정보의 다양하고 복잡한 분포특성을 반영하지 못하며 주관적인 판단에 의존성이 높은 근본적인 문제를 해결하지는 못하고 있다.

이와 달리 최근 광업 분야에서는 지표 및 시추조사, 물리탐사, 실내시험결과 등의 모든 조사 자료를 3차원 공간 데이터베이스화하고 여러 가지 분석 방법을 통해 3차원 지반 모델을 구성하여 이를 매장량 및 품위분포 등의 경제성 평가에서부터 광산설계, 채굴계획 수립 및 가행단계의 공정관리 등의 광업 전반에 활용하는 기법이 호주와 미주 및 남아프리카를 중심으로 개발되고 활용되는 추세이다. 이러한 3차원 지반 모델링 기술은 비단 광업 분야뿐만 아니라 건설 및 토목 분야에도 적용 및 응용될 수 있는 가능성이 높으며 이와 병행하여 지구통계학적 방법을 적용하면 수량 및 공간적으로 제한된 정보로 인해 설계과정의 성토 및 굴착량의 산정, 기초심도 결정, 노선 선정 등의 과정에서 발생할 수 있는 오류를 최소화 할 수 있다. 또한, 토목 설계 수행에 있어서 지형, 지질, 지층 분포 등의 다양한 지반정보를 반영한 3차원 모델링의 활용은 구조물의 위치선정 및 안정성 검토에 유용한 정보를 제공한다.

이 연구에서는 다양한 형태의 지반정보를 분석할 수 있는 3차원 모델링 프로그램(GEMS)를 이용하여 3차원 지형 정보 체계를 구축하고 지반조사를 통해 획득된 지반 특성을 포함한 지반구조 모델을 구성함으로써, 토목 구조물 설계에 있어서 지반정보에 대한 3차원 분석의 필요성을 두 가지 사례를 통해 확인하였다.

### 2. 연구지역의 지질 및 지반 공학적 특징

연구지역은 댐건설예정 지역과 테마공원 건설 부지인 폐광산 지역의 두 지역으로 각각 경상북도

김천시 및 강원도 태백시에 위치하고 있다. 두 지역 모두 건설하고자 하는 토목 구조물에 대하여 비교적 불리한 지질 및 지반 조건을 가지고 있으나 여러 요인으로 인해 토목 구조물의 위치를 일정 범위 이상 변경할 수 없는 한계를 가지고 있어 토목 구조물이 위치할 지점 및 인근에 대한 명확한 판단 근거가 필요한 경우였다.

## 2.1 댐건설예정 지역

댐건설예정 지역은 광역적으로는 선캠브리아기의 화강편마암을 기반암으로 중생대의 화강섬록암과 백악기의 복운모화강암 등이 관입하였고, 이를 관입한 염기성 암맥이 분포한다(그림 1). 화강편마암은 댐건설 예정지점의 서측에 주로 분포하며 댐 지점 인근에는 주로 화강섬록암이 분포한다.[1][2][3][4] 화강섬록암과 화강편마암의 경계부에는 연성전단대가 나타나고, NNE 방향의 우수향 주향이동단층과 WNW 방향의 좌수향 주향이동단층이 주된 단층대로 분포하며 특히 댐 건설 예정지점에는 여러 조의 단층들이 교차한다(그림 1).[5]

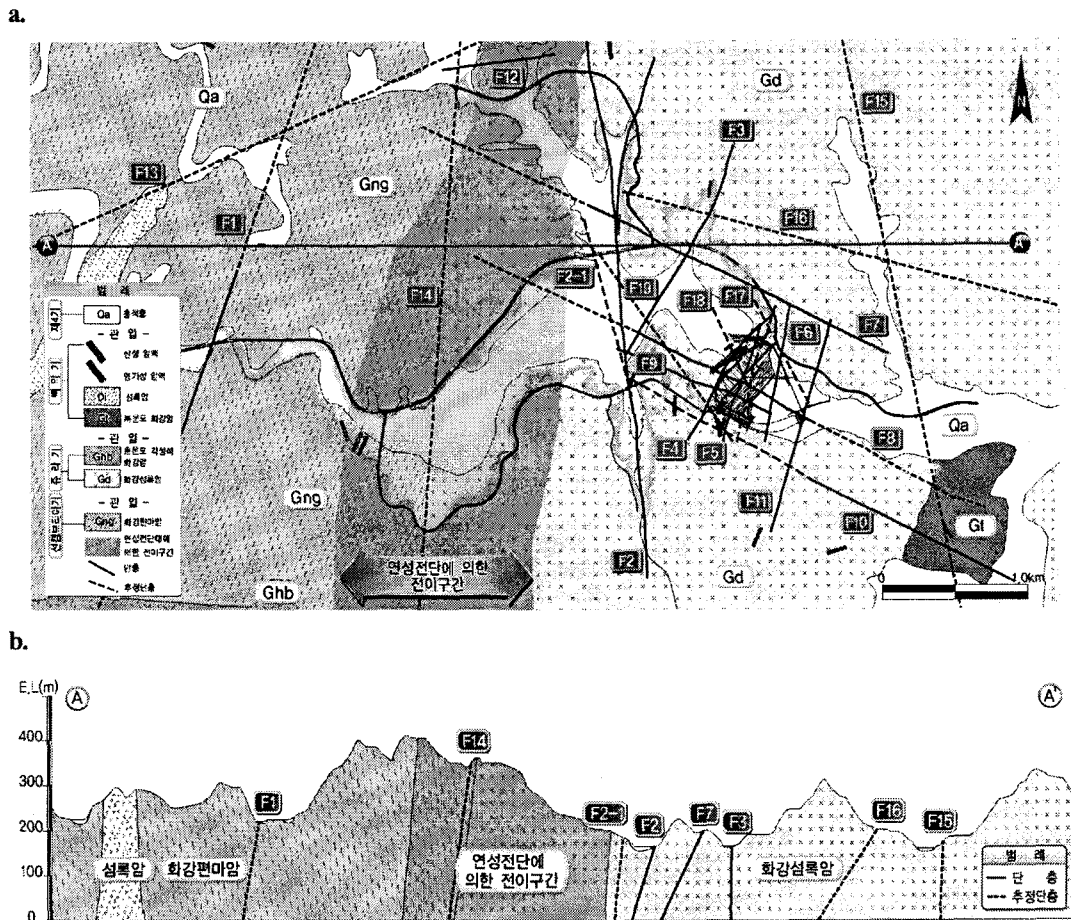


그림 1. a. 댐 주변 지역의 지질도. 넓게는 화강편마암, 화강섬록암, 복운모화강암, 섬록암 등 다양한 암석으로 구성되어 있으나 댐 지점 인근은 주로 화강섬록암으로 구성. b. A-A' 지역의 지질단면도

연구지역에 분포하는 화강섬록암은 화강암과 유사한 암종으로 전형적인 화강암의 풍화특성을 보인다. 전반적으로 화강암은 점이적인 풍화양상을 보이거나 열수작용이 심하거나 절리의 발달이 우세한 경우에는 핵석 등의 급격한 풍화 상태의 변화를 보이기도 하며 특히, 단층 및 파쇄대 등의 구조선과 연하여서는 풍화심도와 상태의 변화가 더욱 급격하게 일어나 조밀한 간격의 충분한 조사가 이루어지지 않는다면 토목 구조물의 안정성 판단에 오류를 범할 가능성이 있다.[6] 연구지역에서 수행된 댐 중심축선에 대한 전기비저항 및 탄성과 굴절법 탐사에서 이렇게 급격하게 풍화심도와 상태가 변화하는 특징이 잘 나타나고 있다(그림 2).

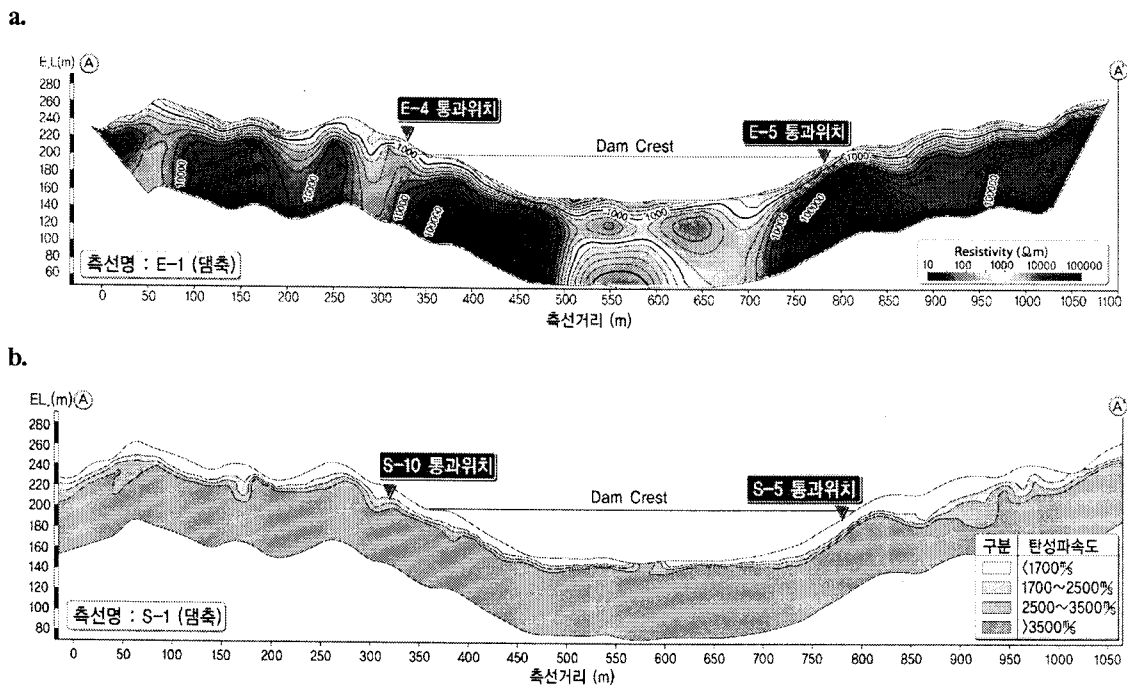


그림 2. 댐 중심축의 물리탐사 단면. a. 전기비저항 탐사단면. b. 탄성파굴절법 탐사단면.

## 2.2 폐광산 지역

광산 지역의 지역경제를 활성화하기 위해 폐광산 지역을 이용한 테마공원 건설을 위한 이 지역은 철암단층을 경계로 동측부의 평안누층군과 서측부의 대석회암층군으로 구분되며 평안누층군은 3회의 향사구조와 2회의 배사구조가 나타나는 중규모 습곡지로 복잡한 지질구조를 보이나, 조선누층군은 1회의 미약한 습곡을 가지는 단사구조를 보이며 평안누층군의 장성층에는 3~4개의 함탄층이 협재되어 일제시대 이전부터 가행되어 온 지역이다.[7][8]

연구지역에는 공동이 포함되어 있을 가능성이 있는 석회암이 분포하고 있으며 지반조건이 불리한 탄층이 복잡한 중첩습곡 구조를 보이며 분포하고 있으며 이들 탄층을 채굴하기 위한 갱도가 분포한다. 특히, 이들 중 일부 천부에 해당하는 갱도의 경우 갱도 붕괴로 인한 합몰사고가 발생하기도 하는 등 갱도로 인한 지반침하 위험성이 높은 지역이다.

### 3. 3차원 지반구조 모델의 구성

#### 3.1 사용 프로그램의 특성

이 연구에 사용된 프로그램은 GEMCOM software 사의 GEMS로 이는 광업분야에서 3차원 지질 모델링 및 광산설계, 채굴계획 수립 등에 이용되어온 3차원 지반모델링 프로그램이다.[9] GEMS는 데이터베이스 기반의 프로그램으로 사용자가 원하는 항목의 특성들을 다양하게 편집하여 분석할 수 있으며 광대하고 복잡한 지형 및 지질을 모사하는 데에 여타의 3차원 지반모델링 프로그램에 비해 더욱 우수한 성능을 발휘한다. GEMS는 크게 공간 데이터베이스를 이용한 조사 자료의 종합 및 3차원 지반모델링과 디스플레이를 위한 exploration evaluation, 3차원 volume calculation 및 3차원 block modeling을 위한 resource evaluation, 광산 설계 및 채굴계획 수립을 위한 mine planning module 및 채굴시 공정관리를 위한 mine production module의 4가지 모듈이 있으며 이 연구에서는 조사 자료의 종합과 해석을 위해 exploration evaluation과 resource evaluation의 두 가지 모듈을 주로 사용했다. GEMS에 포함되어 있는 공간 데이터베이스 방식의 자료구조는 이를 원래의 목적인 광업 분야가 아닌 토목분야에도 유연하게 적용할 수 있게 하였으며 탁월한 3차원기능과 데이터 처리방식을 통해 GIS 분석까지 수행할 수 있었다.

#### 3.2 3차원 공간 데이터베이스 구축

현장에서 실시된 지표지질조사, 시추조사, 물리탐사 등의 현장조사 자료는 각각 적절한 방법을 통해 GEMS에서 그들의 3차원 위치정보와 함께 공간 데이터베이스화 할 수 있다. 즉, 지표지질조사는 x, y, z 좌표로 구성되는 점 데이터와 암종, 풍화도 등의 특성 데이터로, 시추조사의 자료는 시추공의 위치에 대한 x, y, z 좌표와 시추공의 굴착방향과 굴착경사 등에 대한 방향자료가 포함된 선 데이터의 위치정보와 암종, 풍화도 등과 이들 특성의 범위에 대한 데이터로, 물리탐사 자료의 경우 해석결과와 수치 값을 각 탐사단면 위에 위치한 점의 위치정보와 함께 처리하는 방법 등으로 공간 데이터베이스를 구성할 수 있다. 이렇게 구성된 공간 데이터베이스를 이용하여 우리가 원하는 특정 정보를 가지는 통일된 형태로 모든 데이터를 변환하여 이를 이용해 대상지역에 대한 암종 및 지질의 분포 특성이나 다른 물성치의 변화를 3차원 공간에서 추정할 수 있는 것이다. 이 연구에서는 풍화 정도에 따른 풍화 심도 차이가 급격하게 나타나는 화강섬록암 단일 암종으로 구성된 댐 건설 예정지역에서 풍화도 차이에 따른 지층 심도 변화를 추정하기 위하여 지표지질조사, 시추조사, 물리탐사의 결과를 비교하고 이를 모두 풍화도 및 암질변화에 따른 다나까 분류의 암종자료로 변환하여 GEMS의 drillhole 모사 및 자료처리 기능을 이용하여 통일된 시추공자료 형태의 공간 데이터베이스를 구축하였다(그림 3a). 또한, 댐 건설 예정지역 인근에 대한 정밀측량을 통해 1:1,000 축척의 상세 수치지형정보를 획득하여 이 자료를 GEMS를 통해 3차원 DEM(Digital Elevation Map) 형태의 가상 지형을 구축하여 분석의 기본 자료로 이용했다(그림 3b).

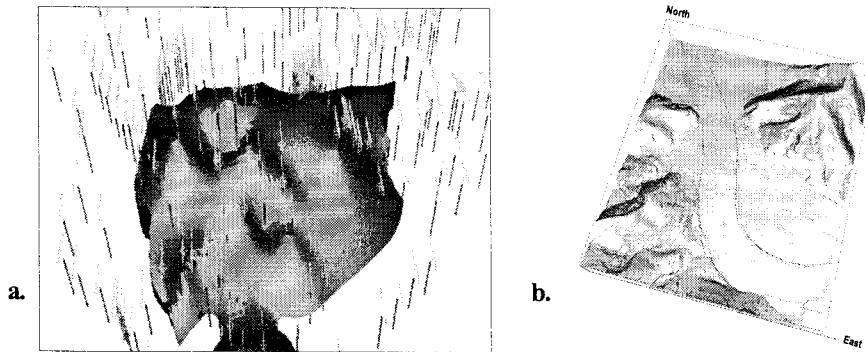


그림 3. a. 시추공 자료의 형태로 변환되어 구성된 3차원 공간 데이터베이스.  
b. 수치지형정보를 이용해 구성된 연구지역의 지형.

### 3.3 GIS개념을 이용한 통계학 및 지구통계학적 분석

일반적으로 토목 설계과정에서 현장에서 수집한 자료는 비용과 현장여건 등의 문제로 인해 우리가 필요로 하는 양에 비해 부족한 경우가 많다. 이런 경우 자료가 부족한 부분에 대해서는 기술자의 주관적 판단에 근거한 불확실성이 높은 추정에 근거해 설계에 필요한 자료들을 보충하게 된다. 이 연구의 경우에도 풍화정도에 따른 지층의 분포특성을 도출하는 과정에서 댐지역 인근 및 재료원 지역에 대한 71공의 시추조사와 총연장 9km에 달하는 격자형 탄성과 굴절법 탐사에도 불구하고 화강섬록암이라는 풍화정도의 변화가 심한 암종의 심도변화를 모사하기에는 부족하였다. 이를 해결하기 위해 연구지역 전체에 대해 10~20m 크기의 격자망을 구성하고 GIS 개념과 통계학 및 지구통계학적 방법을 이용하여 합리적이며 정량적으로 신뢰도 있는 격자별 추정심도를 도출하였다.

연속적, 점이적으로 변하는 토층의 심도, 혹은 풍화 심도는 사면의 경사각, 지표 표고, 지형상에서의 위치, 구조선과의 관계 등에 규제를 받을 것으로 생각된다.[10] 이러한 여러 가지 규제요인 중 현장적용이 가능하고 결정이 용이하며 비교적 규제영향이 클 것으로 생각되는 사면의 경사각, 지표 표고, 구조선 밀도 등에 대하여 심도와의 관계를 분석하였다. 격자 형성 후, 먼저 GIS의 개념을 이용하여 계곡부, 능선부, 정상부 등 산악지형의 특징에 따른 영역으로 연구지역을 구분하고 각 격자별 사면 경사각, 지표 표고, 구조선 밀도를 GEMS의 데이터베이스와 3차원 모사기능을 이용해 도출하였다. 다음으로 이를 기존의 공간 데이터베이스화 된 현장조사 자료의 위치와 비교하여 각 현장 조사자료가 존재하는 지점의 경사각, 지표 표고, 구조선 밀도를 추출하여 이들의 상관관계를 분석하고(그림 4) 다중회귀분석을 통해 각 지층의 심도와 이들 규제요인들의 관계를 도출하였다(표 1). 다나까 분류에 의한 각 암종 별로 0.89~0.97의 다중상관계수와 0.80~0.94의 높은 결정계수를 나타내 사면경사각, 지표표고, 구조선 밀도가 주된 심도 규제요인으로 작용하는 회귀모델이 연구지역의 지층 심도 분포를 설명하는데 신뢰성이 높음을 확인할 수 있었다(표 1). 또한, 다중회귀분석을 통해 도출한 관계에 의해 자료가 부족한 구간의 심도자료를 추정하고 이들의 공간적인 분포특성을 확인하고 보간하기 위해 GIS 기법을 이용 지구통계학 분석을 수행하였다(그림 5).

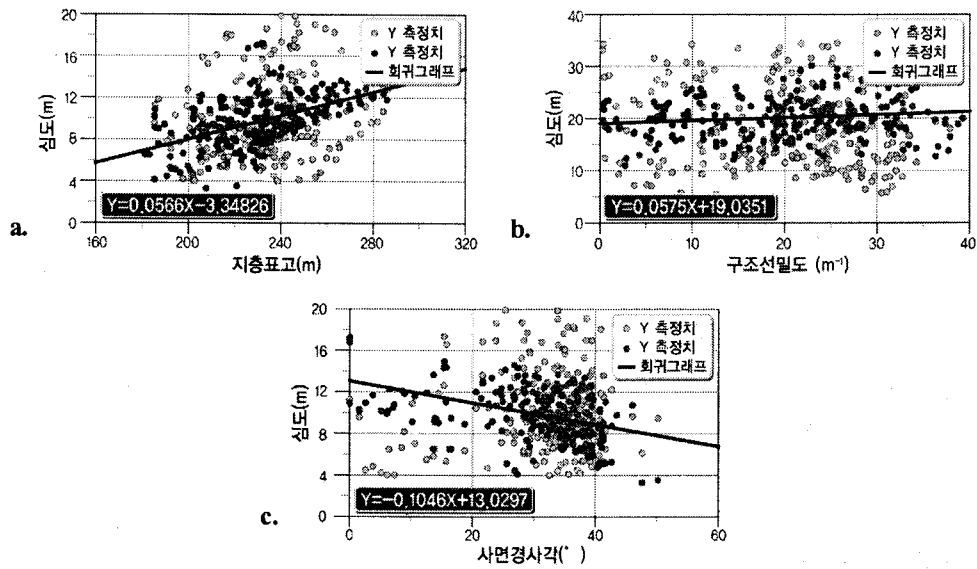


그림 4. D~CL급 암 상단의 심도와 규제요인과의 관계. a. 심도와 지층표고와의 관계. b. 심도와 구조선밀도와의 관계. c. 심도와 사면경사각의 관계.

표 1. 다중회귀분석에 의한 심도와 규제요인의 관계

지층종류	관측수	다중회귀분석에 의한 심도와 규제요인의 관계	다중상관계수	결정계수
풍화암 상단	248	$Y = 0.1512X_1 + 0.1387X_2 + 0.9132X_3 + 2.7983^*$	0.97	0.94
연암 상단	248	$Y = 0.1381X_1 + 0.0470X_2 + 0.8749X_3 + 9.2112^*$	0.94	0.89
경암 상단	248	$Y = 0.1211X_1 + 0.0303X_2 + 0.8195X_3 + 18.4953^*$	0.89	0.80

(주): X1, X2, X3는 각각 사면경사각, 구조선밀도, 지형표고를, Y는 지층경계의 고도를 의미

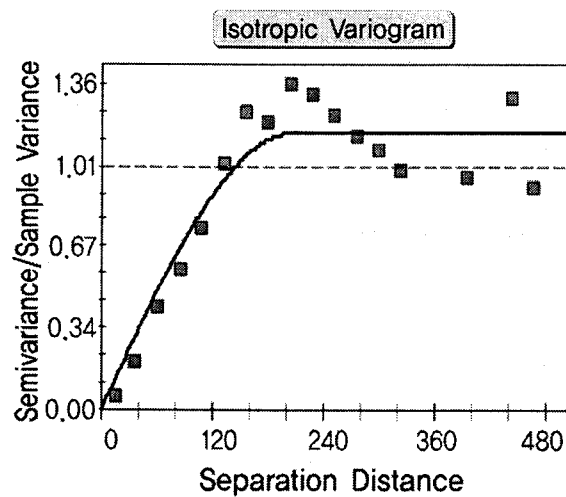


그림 5. D~CL급 암 상단의 심도의 Semi-variogram.

### 3.4 지층면 생성 및 지반구조 모델 구성

통계학 및 지구통계학적 분석을 통해 도출된 격자별 지층 심도 대푯값을 해발고도로 변환하여 연속적으로 분포하는 고도자료에 대한 효과적인 보간법인 GEMS의 laplace gridding법을 이용하여 각 지층의 경계면들을 구성할 수 있으며(그림 6), 이 경계면들을 연결하여 각각의 지층을 그림 7과 같이 구성하였다.

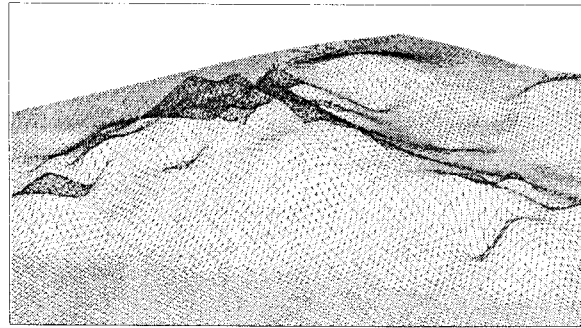


그림 6. Laplace gridding 법으로 구성한 지층 경계면의 삼각망

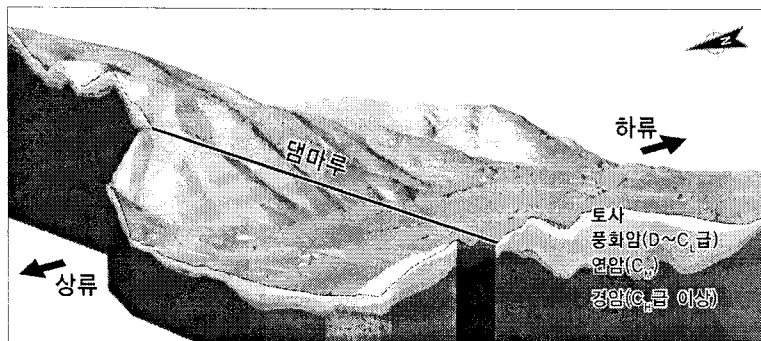


그림 7. 지형과 지층 경계면들로부터 추출한 3차원 지반모델. 댐의 프린스 기초 위치를 따라 절단한 단면.

## 4. 3차원 지반구조 모델의 활용

### 4.1 3차원 지층심도 분석

지층의 풍화심도는 암종, 기후조건, 단층 및 전단대 등의 구조선, 지하수, 지형 표고, 사면경사도, 지형 상에서의 위치 등 다양한 요인에 의해 결정되므로 지역적 특색을 띠며 어느 한 가지 조건으로 관계를 규정하는 것이 어렵기 때문에 2차원 단면과 기술자의 판단에 의존한 수동적 추정이 이루어져 왔다. 이러한 한계를 극복하기 위해 GEMS의 기능을 활용한 지구통계학적 기법과 3차원 모델링 기법을 이용하여 지층을 3차원으로 구성하여 이를 통해 추후 여러 가지 분석에 활용할 수 있다(그림 7). 이 연구에서는 그림 8과 같이 GEMS를 이용하여 지층별 심도분포 등고선도를 2차원 및 3차원으로 작성하여 댐기초 위치선정 및 굴착심도 결정 등 구조물 설계에 활용하였고 GEMS 내에서 구성된 지반 모델 위에 설계된 기초 등의 구조물을 삽입하여 3차원 적인 접촉관계 등의 안정성 검토에 활용하여 평면적 설계에 한계를 극복할 수 있었다.

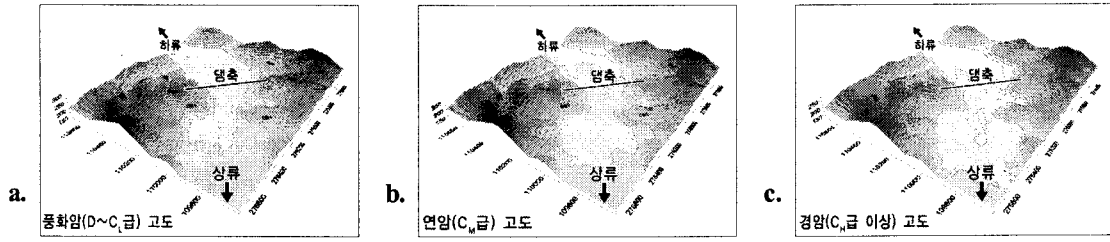


그림 8. 지층경계면의 3차원 등고선 지도. a. 풍화암 상단의 고도. b. 연암 상단의 고도. c. 경암 상단의 고도.

#### 4.2 3차원 Volume Calculation

3차원 지반모델은 또한, 직접적인 볼륨을 생성하는 것이므로 이를 이용해 굴착량, 성토량 등을 손쉬우면서도 정밀하게 산정할 수 있다. 여기에는 GEMS의 TIN Calculation 방법이 사용된다. 일반적으로 토목건설에서 이용되어오던 굴착량 및 성토량 산정 방법은 평행한 여러 개의 횡단면의 면적과 그 간격을 이용해 근사하는 방법으로 부정확성을 내포하고 있으나, GEMS를 이용하면 부정확성과 번거로움을 극복하고 노선위치나 구조물 모양 등의 설계가 변경되더라도 손쉽게 물량을 산정할 수 있다. 이 연구에서는 댐 건설지점 인근의 석산지역들에 대한 3차원 지반모델을 구성하여 그 채굴 가능량을 안정성을 고려한 굴착사면의 경사를 설계에 따라 변화해 가면서 산정 비교하여 최적의 재료 원 위치와 채굴계획을 수립할 수 있었다(그림 9).

#### 4.3 폐광산 지역의 3차원 복합지질도 및 GIS 기법을 이용한 갱도 위험 평가

한편 폐광산 지역에서는 지층과 탄층, 갱도가 포함된 3차원 복합지질도를 구성하여 구조물이 위치 할 지표와 탄층, 갱도의 기하학적 상관관계를 직관적으로 이해할 수 있었으며(그림 10), 이를 이용해 각 지점별 갱도와 지표와의 표고차 등 기하학적인 관계를 추출하여 GIS 기법을 이용한 갱도 및 채굴 적에 대한 잠재위험성 평가를 수행하였다(그림 11a). 더불어 fuzzy 분석기법을 이용한 침하위험도 분석(그림 11b)[8]의 기초자료인 기하학적 지반모델을 제공하여 침하위험을 규명하였으며, 또한 수치 해석 모델의 입력자료로 사용되어 구조물의 위치선정 및 보강계획수립에 기초자료로 활용하였다.

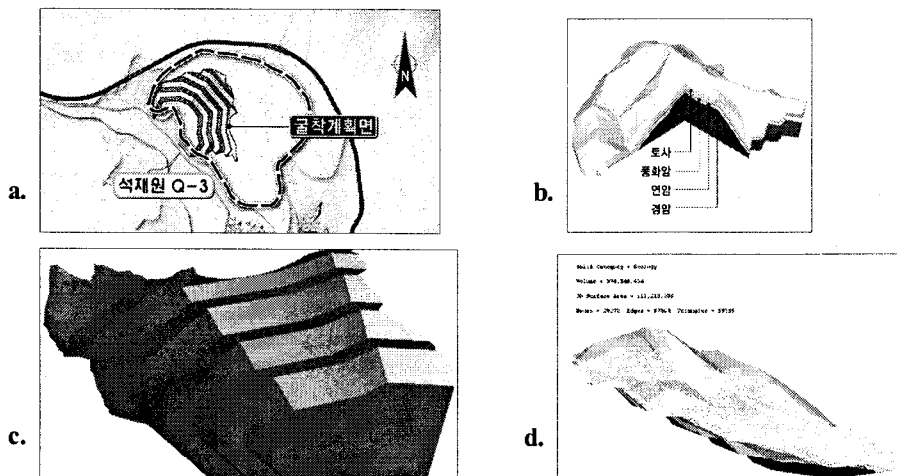


그림 9. 석재원의 가채량 산정. a. 석재원의 채굴계획 평면도. b. 3차원 지반모델. c. 굴착계획면 구성. d. GEMS의 TIN calculation 기능을 이용한 암종별 가채량 산정



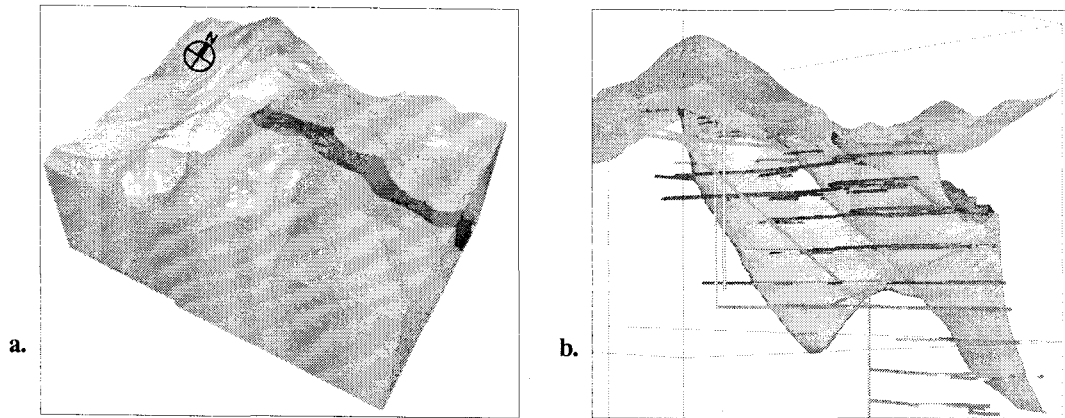


그림 10. 폐광산 지역의 3차원 복합지질도. a. 연구지역 전체 지층모델.  
b. 지형과 탄층 및 갱도의 3차원 모델.

#### 4.4 3차원 Block modeling을 통한 지반정수의 3차원 분포 모델링

이 외에도 3차원 지반모델을 이용하면 이 연구에서는 직접적으로 이용되지는 않았으나 RMR과 같은 지반 등급이나 지반의 역학적, 수리적 특성 값들에 대한 3차원적인 지구통계학 분석인 block modeling이 가능하기 때문에[9] 터널이나 지하저장고, 지하 방사성 폐기물처분장과 같이 3차원적 지반정수의 분포특성을 규명해야 하는 분야에 적극적으로 활용될 수 있다.

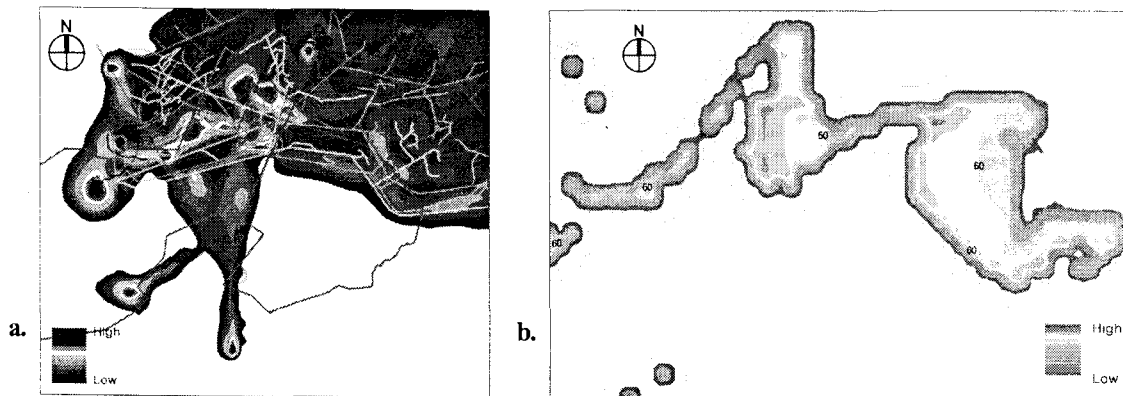


그림 11. GEMS의 갱도를 포함하는 3차원 지반모델을 이용한 갱도와 채굴적 위험도 분석.  
a. 갱도의 위험범위 분석. b. Fuzzy 분석기법을 이용한 침하 위험도 분석.

## 5. 결 론

광업 분야에서 활용되어온 3차원 지반모델링 프로그램인 GEMS를 이용하여 현장조사 자료와 이를 보충하기 위한 GIS기법을 통해 3차원 지반모델을 구성할 수 있으며 이는 토목 설계 분야에 있어서 굴착심도결정, 기초 및 구조물의 안정성 검증 및 위치와 형식 선정, 보강계획수립 등 여러 가지 방면에 적용이 가능하다.

이 연구에서는 GEMS를 이용한 3차원 지반구조 모델링의 적용성을 검토를 위해 불리한 지질 및 지반 조건에도 불구하고 토목 구조물의 위치를 변경할 수 없어 지반에 대한 명확한 판단 근거가

필요한 경우인 댐 지역과 폐광산 지역, 두 지역에 대하여 3차원 지반모델을 구성하고 다음과 같은 분석을 실시했다.

댐 지역에서는 지표지질조사, 물리탐사, 시추조사 등의 지반조사 결과와 정밀측량을 통해 획득된 수치지형도를 이용하여 GEMS를 통해 대상 지역의 3차원 지반 모델을 구성하여 댐 구조물의 위치선정과 공법선정에 활용하였으며, 댐체에 사용될 재료원의 매장량 산정에 활용하였다.

폐광산 지역에서는 GEMS를 이용하여 지질특성과 탄층 및 갱내도를 반영한 3차원 복합 지질도를 구축하고 GIS 기법을 이용하여 폐갱도의 3차원 공간정보를 고려한 채굴적 영향범위를 확률적으로 평가함으로써 구조물 배치 및 안정성 평가를 위한 정량적 자료를 도출하였으며 3차원 지반모델을 직접적으로 2차원, 3차원 수치해석모듈에 입력데이터로 적용하여 해석의 정밀도와 완성도를 높일 수 있었다.

이상에서와 같이 3차원 지반 모델링 프로그램은 토목 설계과정에서 매우 유용한 정보들을 제공할 수 있고, 설계의 정확성과 효율성을 높일 수 있으며, 현재까지의 평면적 관점을 탈피에 현실에 거의 가까운 3차원 기반의 토목 설계의 기초역할을 할 수 있다.

#### ■ 참고문헌 ■

1. 과학기술처, 1996, 1:250,000 안동 지질도폭 및 도폭설명서, 67p.
2. 국립지질조사소, 1969, 1:50,000 무풍도폭 및 도폭설명서, 34p.
3. 국립지질조사소, 1970, 1:50,000 지례도폭 및 도폭설명서, 15p.
4. 한국동력자원연구소, 1989, 1:50,000 김천도폭 및 지질보고서, 22p.
5. 한국수자원공사, 2006, 부항다목적댐 건설공사, 지질 및 지반조사보고서(I), 302p(SK 건설).
6. Lee, S. G., 1993, Weathering of granite, Jour. Geol. Soc. Korea., Vol 29, No 4, 396-413.
7. 태백산지구 지하자원 조사단, 1962, 1:50,000 태백산지구 지질도 .
8. 태백시, 2005, 국민안전체험테마파크 조성공사 기본설계 지반조사보고서, 363p(GS 건설).
9. Gemcom Software International Inc., 1998, Gemcom for Windows User Manual.
10. SK건설주식회사, 2005, 광양항 서측인입철도 건설공사 토질조사보고서, 528-543